

LAPORAN AKHIR
HIBAH BERSAING PERGURUAN TINGGI
Tahun Anggaran 2003



PENGOLAHAN LIMBAH ASAM DENGAN ELEKTRODIALISIS:
Studi Efektivitas Resin Penukar Ion
Terhadap Karakteristik dan Kinerja Proses

KETUA PENELITIAN:
I NYOMAN WIDIASA, ST, MT

Dibiayai oleh Proyek Pengkajian dan Penelitian Ilmu Pengetahuan Terapan,
Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional,
Sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian Hibah Bersaing
Nomor : 242/P4T/DPPM/PHBXI/III/2003 tanggal 28 Maret 2003

JURUSAN TEKNIK KIMIA, FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DIPONEGORO SEMARANG

OKTOBER 2003

UPT-PUSTAK-UNDP

No. Daft.: 579/KI/FT/Ci

Tgl. : 10.10.2003

**SISTEMATIKA LAPORAN AKHIR
HASIL PENELITIAN HIBAH BERSAING
TAHUN ANGGARAN 2003**

LEMBAR IDENTITAS DAN PENGESAHAN	ii
RINGKASAN DAN SUMMARY	iii
PRAKATA	iv
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR/ILUSTRASI	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
I. PENDAHULUAN	1
II. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN TAHUN PERTAMA	2
III. TINJAUAN PUSTAKA	3
IV. METODE PENELITIAN	34
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	41
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	58
VII. RENCANA/PENELITIAN TAHAP SELANJUTNYA	59
A. Tujuan Khusus	59
B. Metode	59
C. Jadwal Kerja	61
DAFTAR PUSTAKA	62
LAMPIRAN	64

LEMBAR IDENTITAS DAN PENGESAHAN LAPORAN AKHIR HASIL PENELITIAN HIBAH BERSAING

A. Judul Penelitian : Pengolahan Limbah Asam dengan Elektrodialisis: Studi Efektivitas Resin Penukar Ion terhadap Karakteristik dan Kinerja Proses

B. Ketua Peneliti

a. Nama Lengkap dan Gelar : I Nyoman Widiasta, ST, MT
 b. Jenis Kelamin : Laki-Laki
 c. Pangkat/Golongan/NIP : Penata Muda Tk I/III-A, 132 132 751
 d. Bidang Keahlian : Teknologi Membran
 e. Fakultas/Jurusan : Teknik / Teknik Kimia
 f. Perguruan Tinggi : UNDIP

C. Tim Peneliti

NAMA DAN GELAR AKADEMIK	BIDANG KEAHLIAN	FAKULTAS/JUR	PERGURUAN TINGGI
1. Heru Susanto ST, MT	Teknologi Pemisahan	Teknik/Teknik Kimia	UNDIP
2. Nita Aryanti, ST, MT	Komputasi Proses	Teknik/Teknik Kimia	UNDIP
3. Darto	Instrumentasi	Teknik/Teknik Kimia	UNDIP
4. Sungkowo	Teknisi	Teknik/Teknik Kimia	UNDIP

D. Pendanaan dan jangka waktu penelitian

Jangka waktu penelitian yang diusulkan : 2 tahun
 Biaya total yang diusulkan : Rp. 74.650.000,00
 Biaya yang disetujui tahun 2000 : Rp. 35.000.000,00

Semarang, 7 Nopember 2003

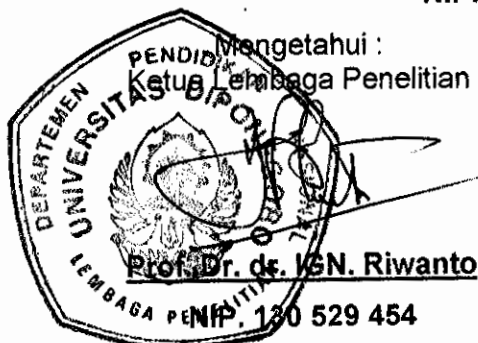
Menyetujui :
 Dekan Fakultas Teknik UNDIP

Ketua Peneliti,



[Handwritten Signature]

I Nyoman Widiasta, ST, MT
 NIP. 132 132 751



RINGKASAN DAN SUMMARY

Limbah asam banyak dihasilkan tidak hanya oleh industri asam itu sendiri, tetapi juga oleh industri-industri penggunaannya seperti industri pupuk, industri logam, industri pestisida, industri polimer, dan berbagai industri kimia yang lain. Pengolahan secara biologis yang dianggap paling murah selama ini tidak akan mampu. Metode yang umum dilakukan adalah netralisasi yang dilanjutkan dengan flukolasi dan filtrasi. Jelas bahwa metode ini melibatkan rangkaian proses yang panjang dan membutuhkan banyak bahan kimia. Dengan peraturan lingkungan semakin ketat dan diberlakukannya standard international (ISO 9000) di era globalisasi ini, perlu diupayakan terobosan teknologi alternatif yang ramah lingkungan yang berpedoman pada konsep produksi bersih dan pendaur-ulangan material.

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan teknik elektrodialisis untuk netralisasi limbah cair yang bersifat asam. Penempatan resin penukar ion di dalam kompartemen-kompartemen unit elektrodialisis diharapkan dapat membangkitkan turbulensi aliran untuk mereduksi polarisasi konsentrasi dan berfungsi sebagai jembatan ion. Pada tahun pertama, pekerjaan dimulai dengan perancangan dan pabrikan unit elektrodialisis. Lebih lanjut dilakukan studi distribusi aliran dan mekanisme fundamental transfer ion. Korelasi empirik karakteristik dan kinerja proses terhadap parameter operasi dikembangkan dan diverifikasi dengan data laboratorium. Pada tahun kedua, eksperimen difokuskan kepada optimasi parameter operasi yang meliputi laju alir, konsentrasi umpan, tegangan terpasang, dan rapat arus. Simulasi numerik juga dilakukan untuk mendapatkan pemahaman kelakuan proses dalam rentang kondisi operasi yang luas.

Kesimpulan sementara yang dapat dicapai dalam penelitian tahun pertama, antara lain:

1. Membran penukar kation (MC-3470) dan membran penukar anion (MA-3475) mempunyai karakteristik dan stabilitas yang sangat baik untuk aplikasi ini.
2. Resin penukar kation (C-100E) dan resin penukar anion (A-400) mempunyai karakteristik dan stabilitas yang baik pada temperatur kamar.
3. Ada perbedaan yang sangat esensial dalam mekanisme aliran listrik dan tahanan elektrik antara elektrodialisis konvensional dan elektrodialisis termodifikasi.
4. Pembentukan ion H^+ dan OH^- pada kompartemen diluar memberikan penurunan tahanan elektrik yang signifikan.
5. Karena peningkatan rapat arus, ada kemungkinan bahwa laju transfer ion akan dikendalikan oleh laju transfer dari ruang ke resin penukar ion.
6. Peningkatan laju alir akan meningkatkan laju transfer massa dari kompartemen diluar menuju kompartemen konsentrat.

PRAKATA

Pengolahan limbah selama ini hanya ditargetkan untuk memenuhi baku mutu. Namun, kesadaran masyarakat semakin tinggi telah mendorong perlunya pendekatan baru dalam pengembangan industri yang akan datang. Proses produksi diharapkan berpedoman pada konsep produksi bersih yang menitikberatkan pada konservasi material dan daur ulang untuk proses produksi. Dengan demikian, dampak negatif yang timbul dari kegiatan industri dapat diminimasi.

Dalam penelitian ini dikembangkan suatu teknologi pemisahan komponen ionik dari larutan akuatik khususnya limbah cair yang bersifat asam. Pada penelitian tahun pertama ini, sasaran yang telah tercapai meliputi: (a) perancangan dan pabrikasi alat elektrodialisis skala laboratorium, (b) karakterisasi membran dan resin penukar ion, dan (c) penyusunan model transfer ion.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kami sampaikan kepada:

- ❖ Direktorat Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional
- ❖ Lembaga Penelitian UNDIP
- ❖ Jurusan Teknik Kimia UNDIP

Atas segala bantuan dan dukungan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini.

Semarang, 7 Nopember 2003

Tim Peneliti

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Sifat-sifat membran penukar ion komersial	15
Tabel 3.2.	Data kunci untuk stack elektrodialisis	30
Tabel 3.3.	Analisis air umpan, diluat, dan retentat	30
Tabel 3.4.	Biaya diluat spesifik dari elektrodialisis	32
Tabel 3.5.	Data operasi dan ekonomi elektrodialisis	32
Tabel 5.1.	Karakteristik membran penukar ion dari Ionac	42
Tabel 5.2.	Karakteristik permeabilitas dan rejeksi membran MC-3470	44
Tabel 5.3.	Karakteristik permeabilitas dan rejeksi membran MA-3475	44
Tabel 5.4.	<i>Liquid-entry pressure</i>	45
Tabel 5.5.	Karakteristik resin penukar anion, Purolite A-400	46
Tabel 5.6.	Karakteristik resin penukar kation, Purolite C-100E	46
Tabel 5.7.	Koefisien fenomenalogika dan konstanta laju transfer	57

DAFTAR GAMBAR/ILUSTRASI

Gambar 3.1.	Prinsip elektrodialisis	11
Gambar 3.2.	Pasangan sel elektrodialisis	12
Gambar 3.3.	Pelunakan air dengan elektrodialisis	13
Gambar 3.4.	Reduksi kandungan asam dari sari jeruk dengan elektrodialisis	13
Gambar 3.5.	Transfer ion dalam membran penukar ion	14
Gambar 3.6.	Membran penukar anion	16
Gambar 3.7.	Struktur Stack elektrodialisis	20
Gambar 3.8.	Disain spacer (pola aliran dalam sel elektrodialisis)	21
Gambar 3.9.	Proses elektrodialisis operasi curah	22
Gambar 3.10.	Proses elektrodialisis operasi 'feed and bleed'	22
Gambar 3.11.	Proses elektrodialisis operasi kontinyu	22
Gambar 3.12.	Elektrodialisis dengan polaritas bolak-balik (<i>electrodialysis reversal, EDR</i>)	23
Gambar 3.13.	Neraca ekuivalen untuk suatu panjang elemen dari kompartemen diluat	24
Gambar 3.14.	Tahanan pasangan sel	26
Gambar 3.15.	Hubungan Arus terhadap beda potensial	27
Gambar 3.16.	Polarisasi konsentrasi dalam elektrodialisis	27
Gambar 3.17.	Susunan seri pasangan-pasangan sel elektrodialisis antara dua elektroda	29
Gambar 3.18.	Diagram alir unit uji	31
Gambar 3.19.	Diagram alir kombinasi elektrodialisis dan kristalisasi	33
Gambar 4.1.	Unit test cell untuk karakterisasi membran elektrodialisis	35
Gambar 4.2.	Prinsip elektrodialisis termodifikasi	36
Gambar 4.3.	Konfigurasi partikel penukar ion di dalam kompartemen diluat	36
Gambar 4.4.	Skematik unit elektrodialisis	37
Gambar 5.1.	Hubungan konduktivitas terhadap konsentrasi larutan	41
Gambar 5.2.	Dinamika fluks permeat	43
Gambar 5.3.	Transmisi solut organik melalui membran penukar ion	44
Gambar 5.4.	Fluks permeat terhadap tekanan lintas membran	45
Gambar 5.5.	Diagram alur perancangan alat elektrodialisis	48
Gambar 5.6.	Membran penukar anion MA-3475	49
Gambar 5.7.	Membran penukar kation MC-3470	49
Gambar 5.8.	Rangka penyangga membran	50
Gambar 5.9.	Stack elektrodialisis	51
Gambar 5.10.	Alat elektrodialisis skala laboratorium	51

Gambar 5.11.	Perbandingan karakteristik V-I antara proses elektrodialisis termodifikasi (EDI) dan elektrodialisis konvensional (ED)	52
Gambar 5.12.	Karakteristik V-I stack elektrodialisis termodifikasi	53
Gambar 5.13.	Profil tahanan spesifik stack elektrodialisis	54
Gambar 5.14.	Pengaruh rapat arus terhadap laju perpindahan ion	55
Gambar 5.15.	Pengaruh konsentrasi dan rapat arus terhadap efisiensi daya	55
Gambar 5.16.	Hubungan antara laju perpindahan air dan rapat arus	57

DAFTAR LAMPIRAN

A. Program Komputasi	64
B. Publikasi	66

BAB I

PENDAHULUAN

2.1. Latar Belakang

Asam inorganik seperti asam sulfat dan asam klorida dan asam organik seperti asam sitrat dan asam laktat mempunyai fungsi sangat penting dalam industri pupuk, industri logam, industri pestisida, industri polimer, dan berbagai industri kimia [1]. Jutaan ton per tahun diperlukan untuk memenuhi kebutuhan industri-industri tersebut [2]. Di Indonesia, jumlah kebutuhan asam diperkirakan mencapai 200.000 ton per tahun. Oleh karena itu, tidak mengherankan jika produk tersebut memberikan nilai komersial yang menguntungkan.

Di lain pihak, limbah asam yang dihasilkan tidak hanya oleh industri asam itu sendiri, tetapi juga oleh industri-industri penggunaannya, masih merupakan persoalan pelik yang perlu penanganan serius. Pengolahan secara biologis yang dianggap paling murah selama ini tidak akan mampu. Metode yang umum dilakukan adalah netralisasi yang dilanjutkan dengan flukolasi dan filtrasi. Jelas bahwa metode ini melibatkan rangkaian proses yang panjang dan membutuhkan banyak bahan kimia. Dengan peraturan lingkungan semakin ketat dan diberlakukannya standard international pada era globalisasi ini, perlu diupayakan terobosan teknologi alternatif yang ramah lingkungan yang berpedoman pada konsep produksi bersih dan pendaur-ulangan material.

Seiiring dengan kemajuan teknologi membran saat ini, proses elektrodialisis dipandang sebagai alternatif yang sangat rasional. Elektrodialisis adalah proses membran yang dicirikan oleh suatu medan listrik tegak lurus terhadap membran penukar ion (*ion exchange membrane*). Sebagai akibat dari adanya gaya dorong (*driving force*) medan listrik, anion-anion dalam larutan akan ditarik ke arah anoda dan kation-kation ditarik ke arah katoda. Fakta menunjukkan bahwa teknologi ini telah sukses diaplikasikan untuk desalinasi air laut [3-5], pengambilan asam [6-8], dan demineralisasi produk fermentasi [9]. Semua aplikasi ini melibatkan larutan konsentrasi tinggi sehingga tahanan elektrik yang ditimbulkan oleh ruah larutan tidak signifikan.

Seperti halnya proses-proses membran fasa cair yang lain, polarisasi konsentrasi pada kedua sisi membran penukar ion harus diperhitungkan. Pada kompartemen diluat (konsentrasi rendah) unit elektrodialisis, konsentrasi ion berkurang menuju permukaan membran akibat adanya permeasi ion [10]. Pada kondisi operasi yang tidak menguntungkan, konsentrasi ion sangat rendah sehingga yang tersedia tidak mencukupi untuk mengakomodasi perpindahan ion. Akibatnya adalah sebagian besar daya digunakan untuk proses elektrolisis air menjadi ion hidrogen dan hidroksida [11]. Hal ini ditunjukkan oleh

penurunan level pH diluat, peningkatan tahanan elektrik, peningkatan pH konsentrat atau penurunan efisiensi arus [12]. Akibatnya adalah kinerja proses menjadi sangat rendah.

Penempatan resin penukar ion di dalam ruang diluat diharapkan dapat membangkitkan turbulensi aliran untuk mereduksi polarisasi konsentrasi dan berfungsi sebagai jembatan ion. Perpindahan ion dalam sistem ini bersifat unik karena difasilitasi oleh dua faktor sekaligus. Faktor pertama adalah jembatan ion dan membran sebagai pengendali selektivitas perpindahan ion. Faktor kedua adalah perbedaan potensial listrik antara anoda dan katoda yang dibangkitkan oleh sumber tegangan arus searah. Dengan cara demikian, teknik ini dapat digunakan untuk pengolahan limbah cair yang bersifat asam. Proses ini diharapkan dapat dioperasikan secara kontinu tanpa perlu regenerasi secara kimiawi. Disamping itu, sistem dapat dibuat berbentuk modul yang kompak, mudah dioperasikan, perawatan sederhana, serta mudah di-*scale-up* sesuai dengan beban umpan yang harus diproses.

Aspek ekonomi sistem elektrodialisis ditentukan sebagian besar oleh biaya energi listrik (daya) dan biaya investasi. Pemakaian daya dan biaya unit bergantung pada tahanan elektrik fluida, rapat arus, dan tegangan terpasang. Kebutuhan luas permukaan membran berkurang dengan meningkatnya rapat arus, sedangkan konsumsi energi spesifik akan meningkat. Karena biaya operasi dan pemeliharaan spesifik hampir tidak bergantung pada rapat arus, kecenderungan biaya investasi dan energi yang berlawanan ini paling menentukan rancangan dan pengoperasian proses elektrodialisis yang optimum. Pada kondisi dimana rapat arus tidak linear lagi terhadap tegangan terpasang, daya sebagian digunakan untuk proses elektrolisis air menjadi ion hidrogen dan hidroksida. Kondisi optimum harus ditentukan secara individu menggunakan hasil-hasil investigasi laboratorium.

2.2. Subyek Penelitian

Subyek penelitian ini adalah teknologi elektrodialisis yang menggunakan sel elektrokimia, membran penukar ion, dan resin penukar ion sebagai alternatif untuk pengolahan limbah cair yang bersifat asam. Untuk mendapatkan pemahaman yang mendasar dan komprehensif tentang teknologi elektrodialisis dalam aplikasi ini, parameter kunci yang akan diteliti meliputi aspek elektrokimia (tegangan terpasang, rapat arus), aspek hidrodinamika (laju alir dan distribusi penempatan resin), dan aspek fluida (konsentrasi umpan). Model matematik juga dikembangkan untuk mengidentifikasi karakteristik dan kinerja proses pada rentang kondisi operasi praktis

3.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan teknik elektrodialisis untuk pengolahan limbah cair yang bersifat asam. Secara spesifik, tujuan penelitian ini adalah :

- (i) Mempelajari mekanisme dan karakteristik transfer ion-ion dalam unit elektrodialisis
- (i) Mempelajari pengaruh parameter proses terhadap laju transfer ion dan efisiensi daya secara eksperimental dan numerik.
- (i) Membuat dan menguji prototipe unit elektrodialisis kapasitas 100-150 liter per hari.
- (i) Membuat rancangan proses dan estimasi biaya untuk kapasitas 20 M³ per jam.

1.4. Hasil Yang Ditargetkan

Hasil yang ditargetkan dalam penelitian ini antara lain:

- (i) Sebuah prototipe unit elektrodialisis yang kompak, modular, mampu bekerja secara kontinu, dan mudah dioperasikan
- (ii) Korelasi empirik antara karakteristik dan kinerja proses terhadap parameter operasi (formulasi matematik)
- (iii) Data-data teknis laboratorium untuk perancangan dan pengoperasian proses.
- (iv) Satu rancangan proses (diagram alir) dan deskripsi tentang biaya operasi dan biaya investasi untuk kapasitas 20 M³ per jam.
- (v) Satu draf usulan paten

BAB II

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN TAHUN PERTAMA

2.1 Tujuan Penelitian

Penelitian pada tahun pertama difokuskan pada beberapa aspek berikut :

1. Karakterisasi membran dan resin penukar ion.
2. Perancangan dan pabrikan alat elektrodialisis skala laboratorium.
3. Penyusunan model transfer air dan ion.
4. Pengaruh parameter operasi terhadap kinerja proses.

2.2 Manfaat Penelitian

Dari hasil penelitian tahun pertama dapat ditentukan:

- (a). Karakteristik dan stabilitas membran penukar kation (MC3470), membran penukar anion (MA3475), resin penukar anion (Purolite A-400), dan resin penukar kation (Purolite C-100E) pada pH rendah.
- (b). Pengaruh keberadaan resin penukar ion terhadap tahanan elektrik spesifik stack elektrodialisis.
- (c). Mekanisme transfer ion dalam proses elektrodialisis konvensional dan elektrodialisis termodifikasi.
- (d). Pengaruh rapat arus dan konsentrasi umpan terhadap laju transfer ion dan efisiensi daya.
- (e). Metode perancangan stack elektrodialisis.